

Switched Reluctance Motor in Star Connection (SRS)

6.12.2017

Andreas Leich, DLR

Maik Hohmuth, ILEAG

Philip Hennig, ILEAG

Wissen für Morgen



ILEAG e.V.
Institut für leichte elektrische Antriebe und Generatoren

Gliederung

Anforderungen

Stand der Technik

Ansatz SRS

Simulationsergebnisse

Ausblick



Gliederung

Anforderungen

Stand der Technik

Ansatz SRS

Simulationsergebnisse

Ausblick



ILEAG e.V.
Institut für leichte elektrische Antriebe und Generatoren



Anforderungen

Induction Versus DC Brushless Motors

Wally Rippel, Principal Power Electronics Engineer • January 9, 2007

*Wally Rippel is a long-time **proponent of electric vehicles**. Prior to joining Tesla Motors, he was an engineer at **AeroVironment**, where he helped develop the **EV1** for General Motors and was featured in the documentary movie, **Who Killed the Electric Car?** Wally has also worked for the **Jet Propulsion Laboratory** on electric vehicle battery research, among other projects. In 1968, as a Caltech undergraduate student, he built an electric car (a converted 1958 Volkswagen microbus) and won the **Great Transcontinental Electric Car Race** against MIT.*

“... Add some feedback loops such that the inverter produces the exact frequency that the motor “desires,” and the induction motor is now **capable of competing with DC and DC brushless** for vehicle applications.”

“... One of the main differences is that much less **rotor heat** is generated with the DC brushless drive. “

Quelle: <https://www.tesla.com/blog/induction-versus-dc-brushless-motors>



Anforderungen

Induction Versus DC Brushless Motors

Wally Rippel, Principal Power Electronics Engineer • January 9, 2007

*Wally Rippel is a long-time **proponent of electric vehicles**. Prior to joining Tesla Motors, he was an engineer at **AeroVironment**, where he helped develop the **EV1** for General Motors and was featured in the documentary movie, **Who Killed the Electric Car?** Wally has also worked for the **Jet Propulsion Laboratory** on electric vehicle battery research, among other projects. In 1968, as a Caltech undergraduate student, he built an electric car (a converted 1958 Volkswagen microbus) and won the **Great Transcontinental Electric Car Race** against MIT.*

“... With DC brushless, as machine size **grows**, the **magnetic losses increase** proportionately and part load **efficiency drops**. With induction, as machine size grows, losses do not necessarily grow. Thus, induction drives may be the favored approach where high-performance is desired; peak efficiency will be a little less than with DC brushless, but average efficiency may actually be better.”

Quelle: <https://www.tesla.com/blog/induction-versus-dc-brushless-motors>



Anforderungen

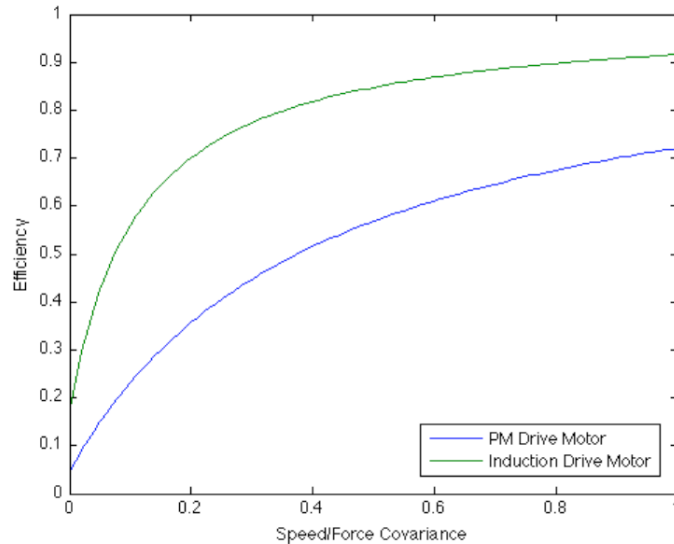
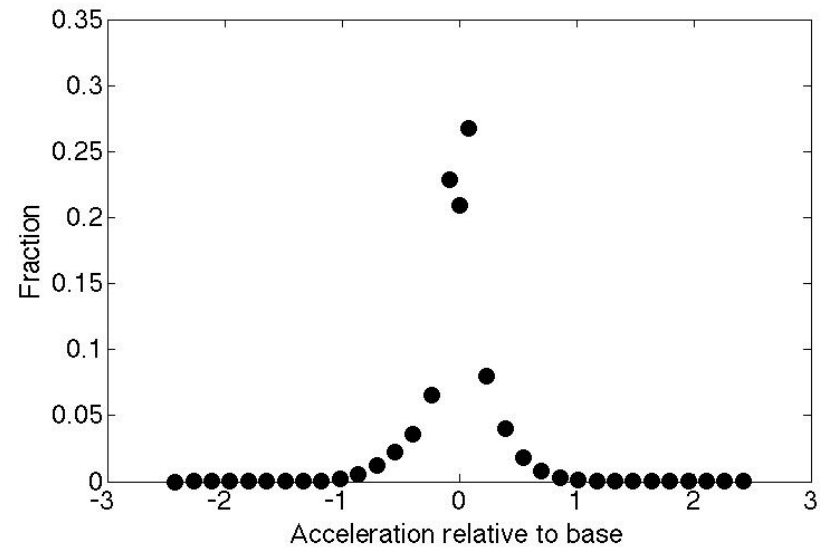
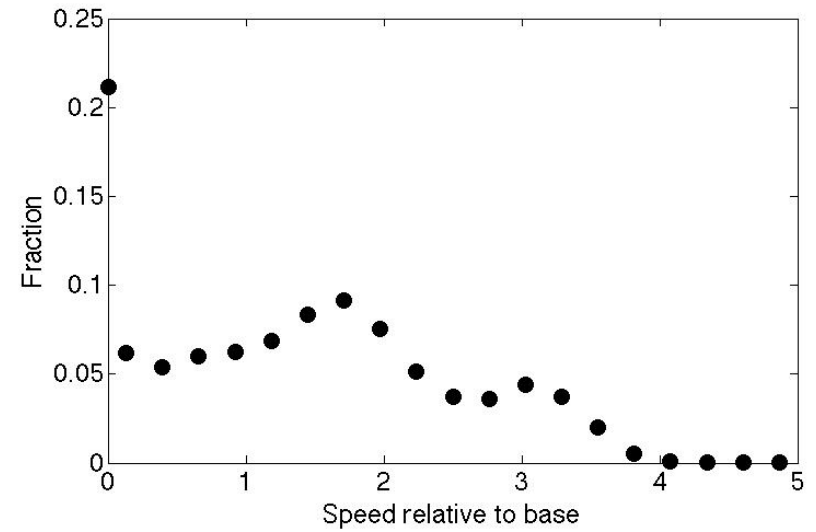


Figure 8: Drive Cycle Comparison with Revised PM Efficiency Assumptions



Quelle: Kirtley, J. L. (2011). Traction Motor Design Considerations



Problemstellung

- Scope: Elektromotoren für Antriebslösungen in E-Fahrzeugen
- Spezifische Anforderungen
 - Geringes Gewicht, Geringe Kosten, Hohes Antriebsdrehmoment → Hohe Drehmomentdichte (volumetrisch (Nm/l), gravimetrisch (Nm/kg))
 - Geringe/keine Ummagnetisierungsverluste im Teillastbereich (kein Schleppmoment)
 - Hoher Wirkungsgrad bezogen auf Normzyklus



Aufgabenstellung ABM Greiffenberger

Stator:

$$R_a = 90mm$$

$$R_i = 51,5mm$$

$$l_s = 200mm$$

$$N_n = 36$$



Leistung Nenn / Peak [kW]	8,0 / 15,0
Max. Drehmoment [Nm]	70
Max. Drehzahl [min ⁻¹]	6.000
Länge [mm]	336
Durchmesser [mm]	200
Gewicht [kg]	39

Kleintransporter



Gliederung

Anforderungen

Stand der Technik

Ansatz SRS

Simulationsergebnisse

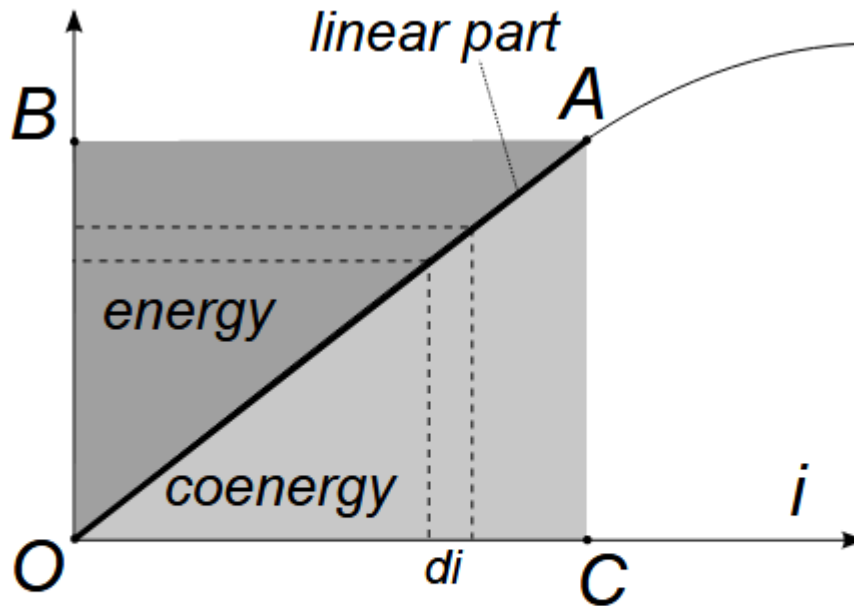
Ausblick



ILEAG e.V.
Institut für leichte elektrische Antriebe und Generatoren



Co-Energie



$$W' = \int_0^{i_{max}} \Phi(i) di$$

$$\Phi = \int_A B dA \approx i L$$

$$\Delta W' = W'_{aligned} - W'_{unaligned}$$

$$M \sim \frac{\Delta W'}{\Delta \phi} N_{magnetische\ Kreise}$$

Quelle: <https://en.wikipedia.org/wiki/Coenergy>

Ausnutzung Eisen:

$$\frac{N_{magnetische\ Kreise}}{N_{maximal\ mögliche\ Magnetische\ Kreise}}$$

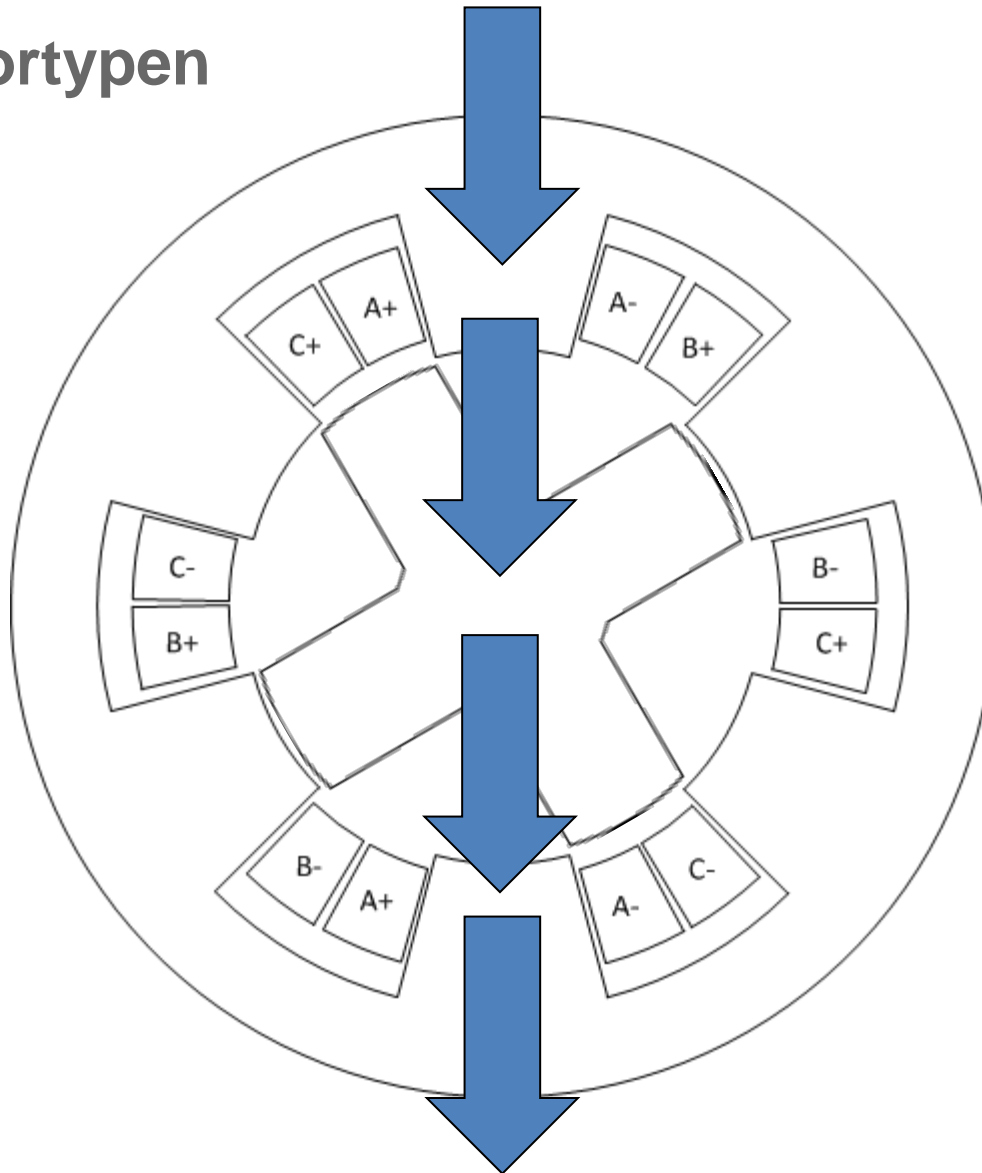
Theoretisch maximal volumetrisch mögliches Drehmoment Referenzmotor (200mm x 180mm) 36 Nuten, Luftspalt 1,5mm, Ausnutzung Eisen = 1:

$$B_{max} = 1,7T$$

$$M_{max} = \mathbf{582\ Nm}$$



Motortypen



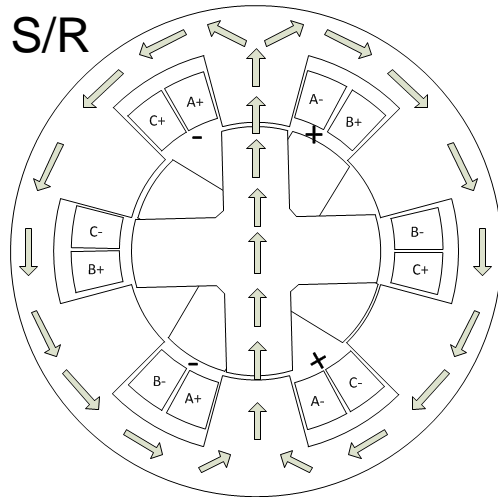
Charakterisierungsfaktoren

- Eine **oder** zwei magnetische Spannungsquellen
- Magnetische Spannungsquellen in Stator **oder** Stator und Rotor
- Ausnutzung Eisen

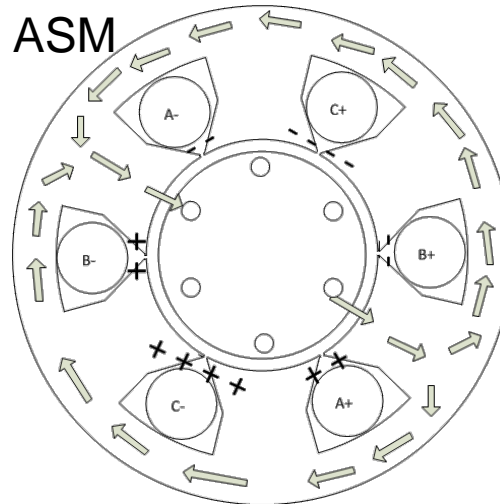


Motortypen

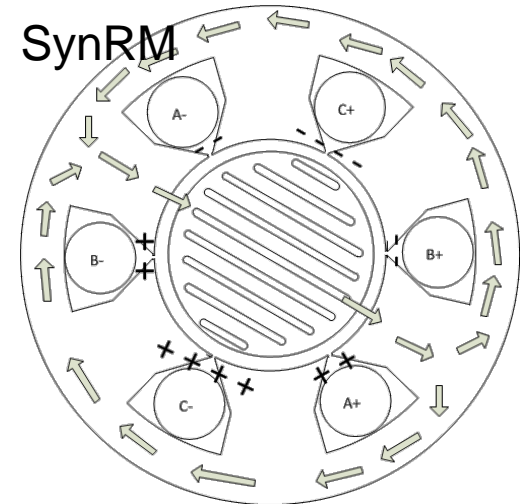
S/R



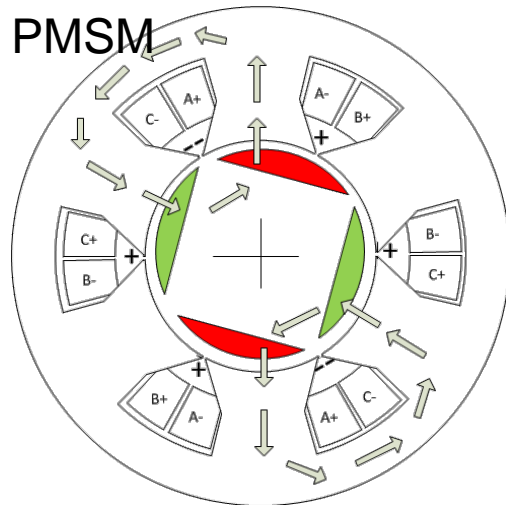
ASM



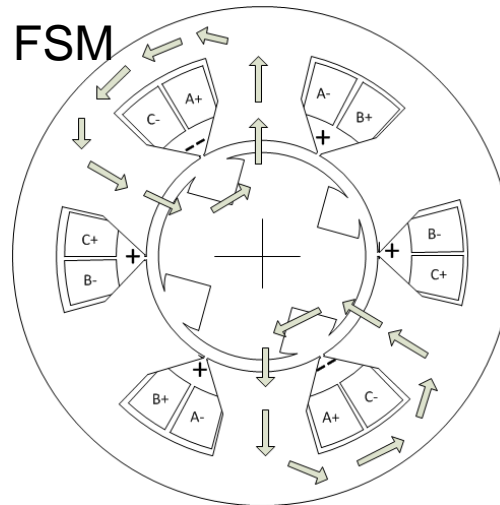
SynRM



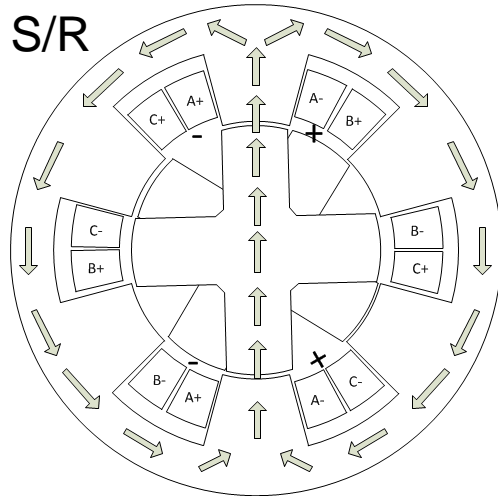
PMSM



FSM



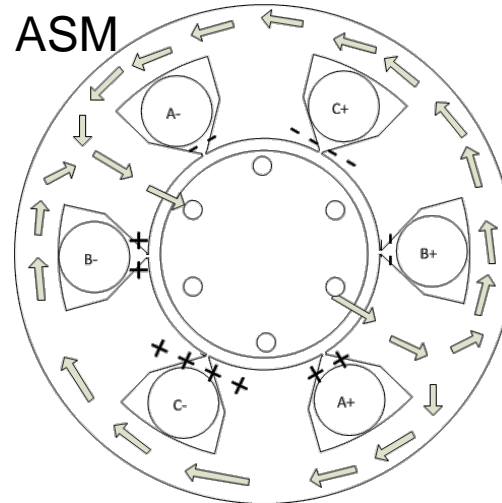
Mögliches Drehmoment (36 Nuten, 200mm, 180mm)



Ausnutzung Eisen:
12 von 36 Statorzähnen

Luftspalt: 0,5 mm

$$M_{max} = 70Nm$$



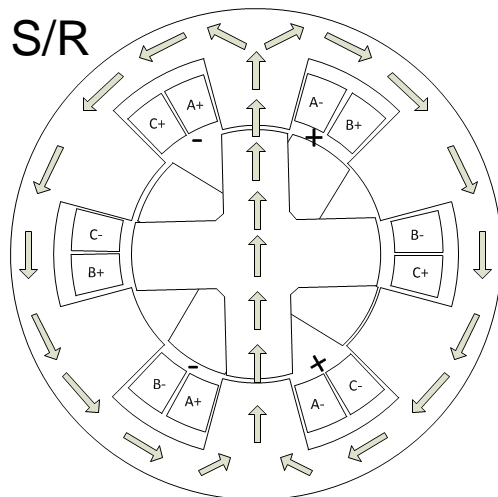
Ausnutzung Eisen:
24 von 36 Statorzähnen

+ Käfigläufer
Luftspalt: 0,5 mm

$$M_{max} = 70Nm$$



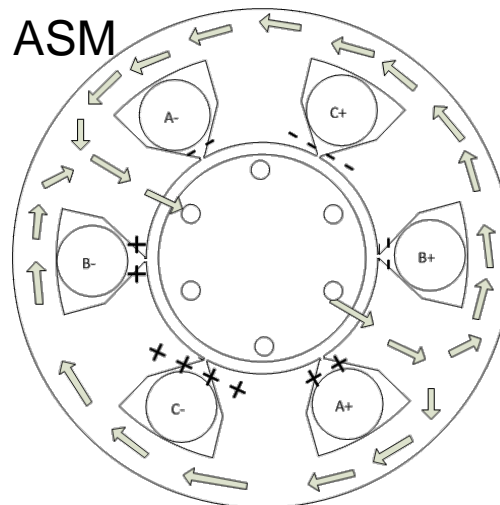
Mögliches Drehmoment (36 Nuten, 200mm, 180mm)



Ausnutzung Eisen:
12 von 36 Statorzähnen

Luftspalt: 0,5 mm

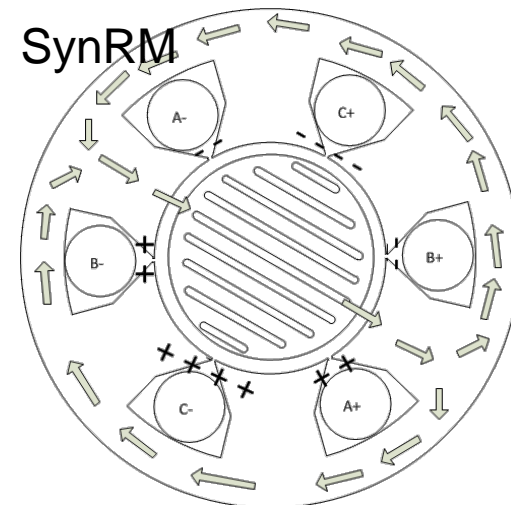
$$M_{max} = 70Nm$$



Ausnutzung Eisen:
24 von 36 Statorzähnen

+ Käfigläufer
Luftspalt: 0,5 mm

$$M_{max} = 70Nm$$



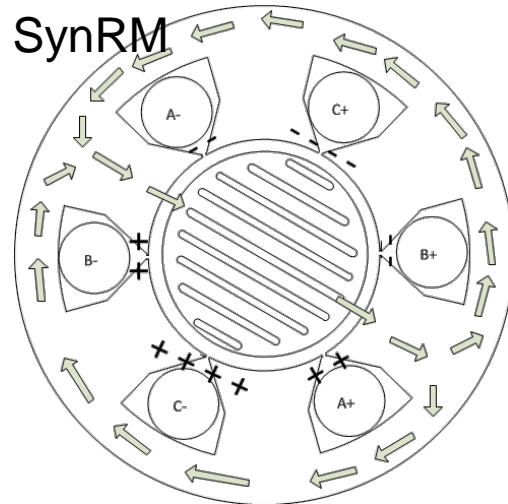
Ausnutzung Eisen:
24 von 36 Statorzähnen

Luftspalt: 0,5 mm

$$M_{max} = 70Nm$$



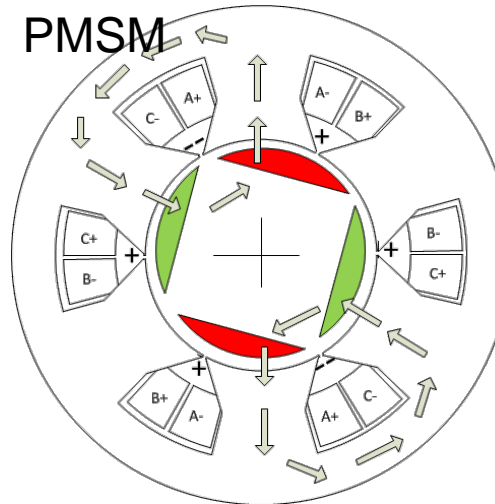
Mögliches Drehmoment (36 Nuten, 200mm, 180mm)



Ausnutzung Eisen:
24 von 36 Statorzähnen

Luftspalt: 0,5 mm

$$M_{max} = 70 Nm$$



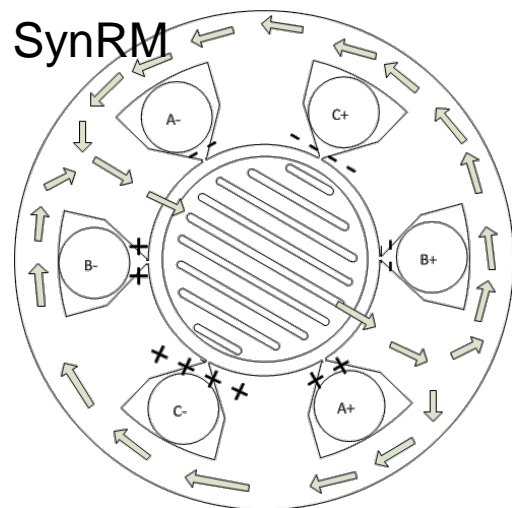
Ausnutzung Eisen:
24 von 36 Statorzähnen

Luftspalt: 1,5 mm

$$M_{max} = 390 Nm$$



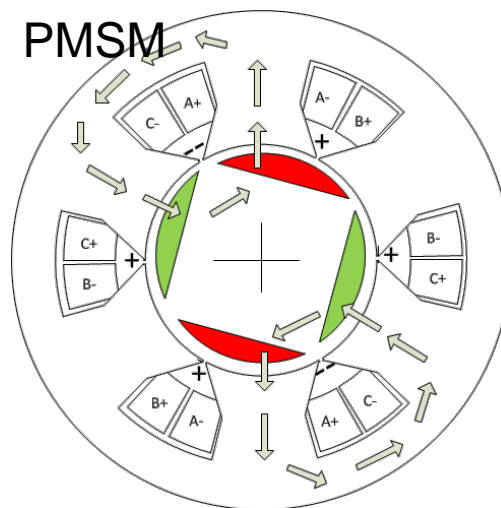
Mögliches Drehmoment (36 Nuten, 200mm, 180mm)



Ausnutzung Eisen:
24 von 36 Statorzähnen

Luftspalt: 0,5 mm

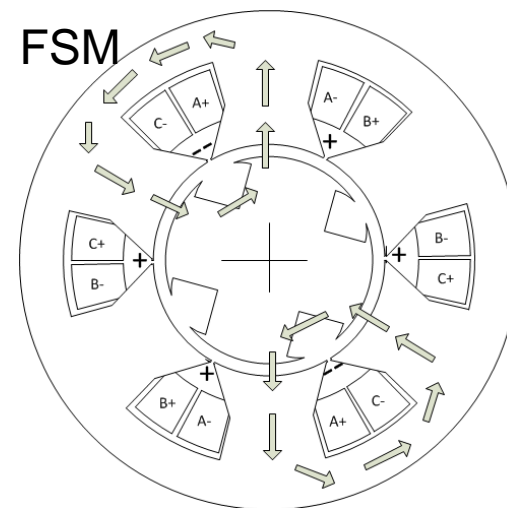
$$M_{max} = 70 Nm$$



Ausnutzung Eisen:
24 von 36 Statorzähnen

Luftspalt: 1,5 mm

$$M_{max} = 390 Nm$$



Ausnutzung Eisen:
24 von 36 Statorzähnen

Luftspalt: 1,5 mm

$$M_{max} = 390 Nm$$



Gliederung

Anforderungen

Stand der Technik

Ansatz SRS

Simulationsergebnisse

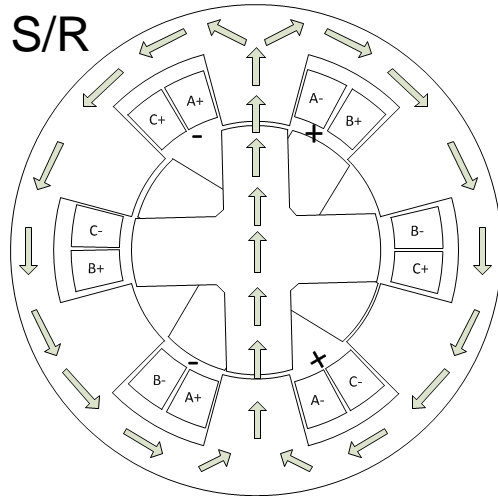
Ausblick



ILEAG e.V.
Institut für leichte elektrische Antriebe und Generatoren



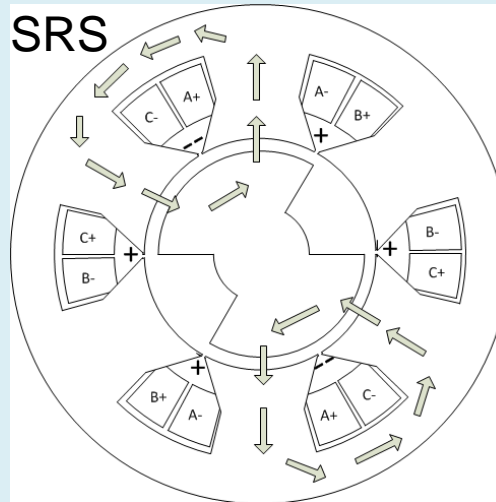
Motortypen



Ausnutzung Eisen:
12 von 36 Statorzähnen

Luftspalt: 0,5 mm

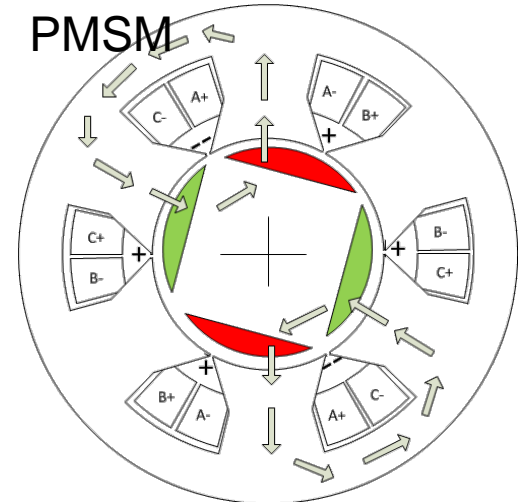
$$M_{max} = 70 Nm$$



Ausnutzung Eisen:
24 von 36 Statorzähnen

Luftspalt: 0,5mm

$$M_{max} = 98 Nm$$



Ausnutzung Eisen:
24 von 36 Statorzähnen

Luftspalt: 1,5 mm

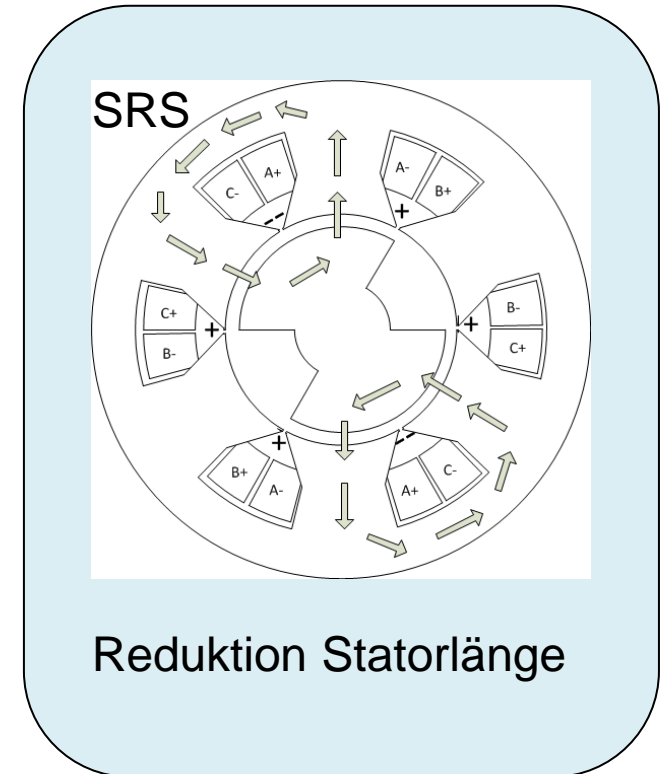
$$M_{max} = 390 Nm$$



Aufgabenstellung ABM Greiffenberger

Spezifische Problemstellungen:

- Nachweis der Wirksamkeit des Motorkonzeptes
 - in der Simulation
 - am Prototypen
- Entwurf Hochpolige Maschinen
- Berücksichtigung Wickelraum (Füllfaktor 0,6) und Kupferverluste (max. 350W) bei Nennleistung 8kW
- Drehmoment-Ripple, Rotorlage-Schätzung



Gliederung

Anforderungen

Stand der Technik

Ansatz SRS

Simulationsergebnisse

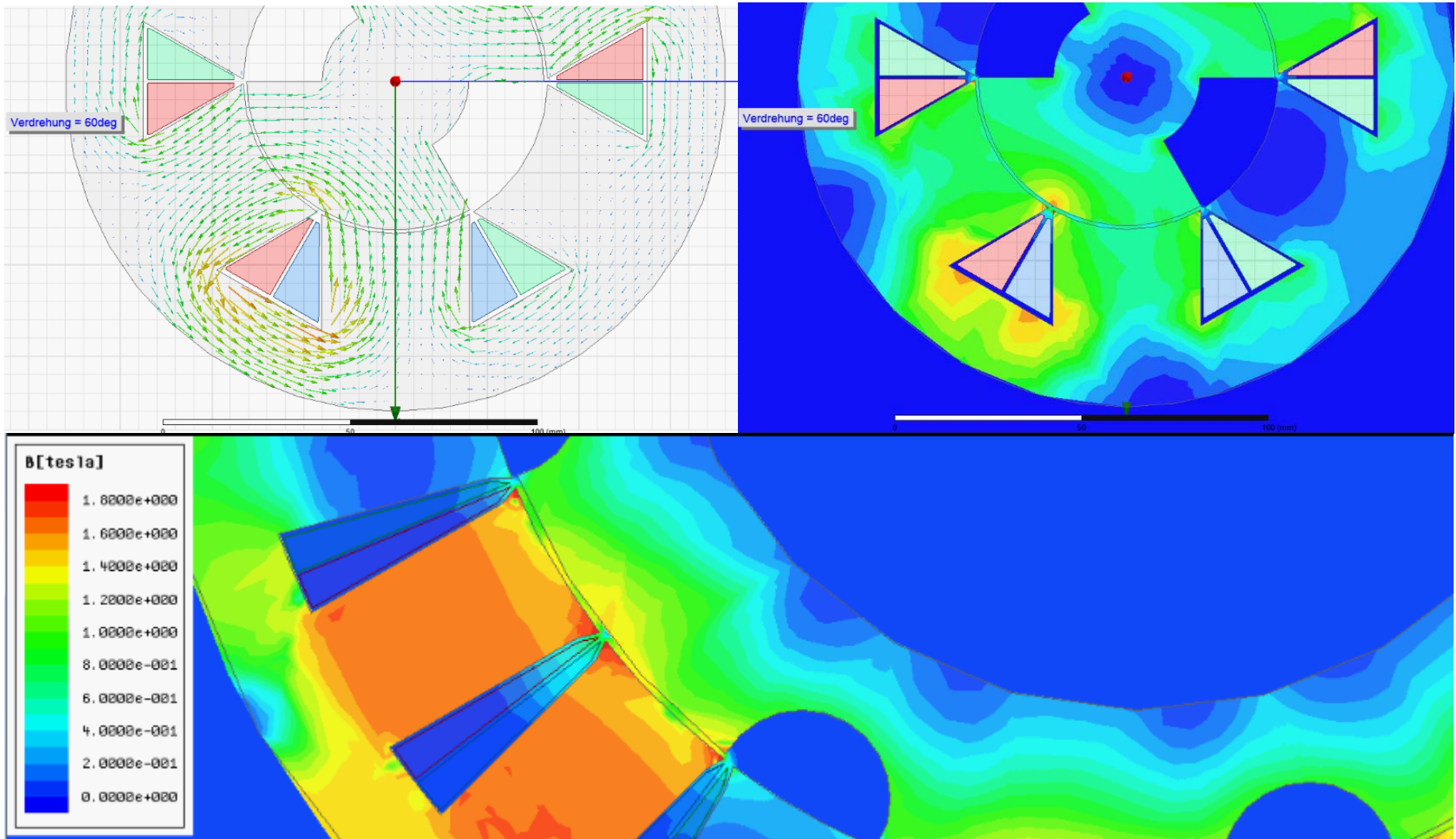
Ausblick

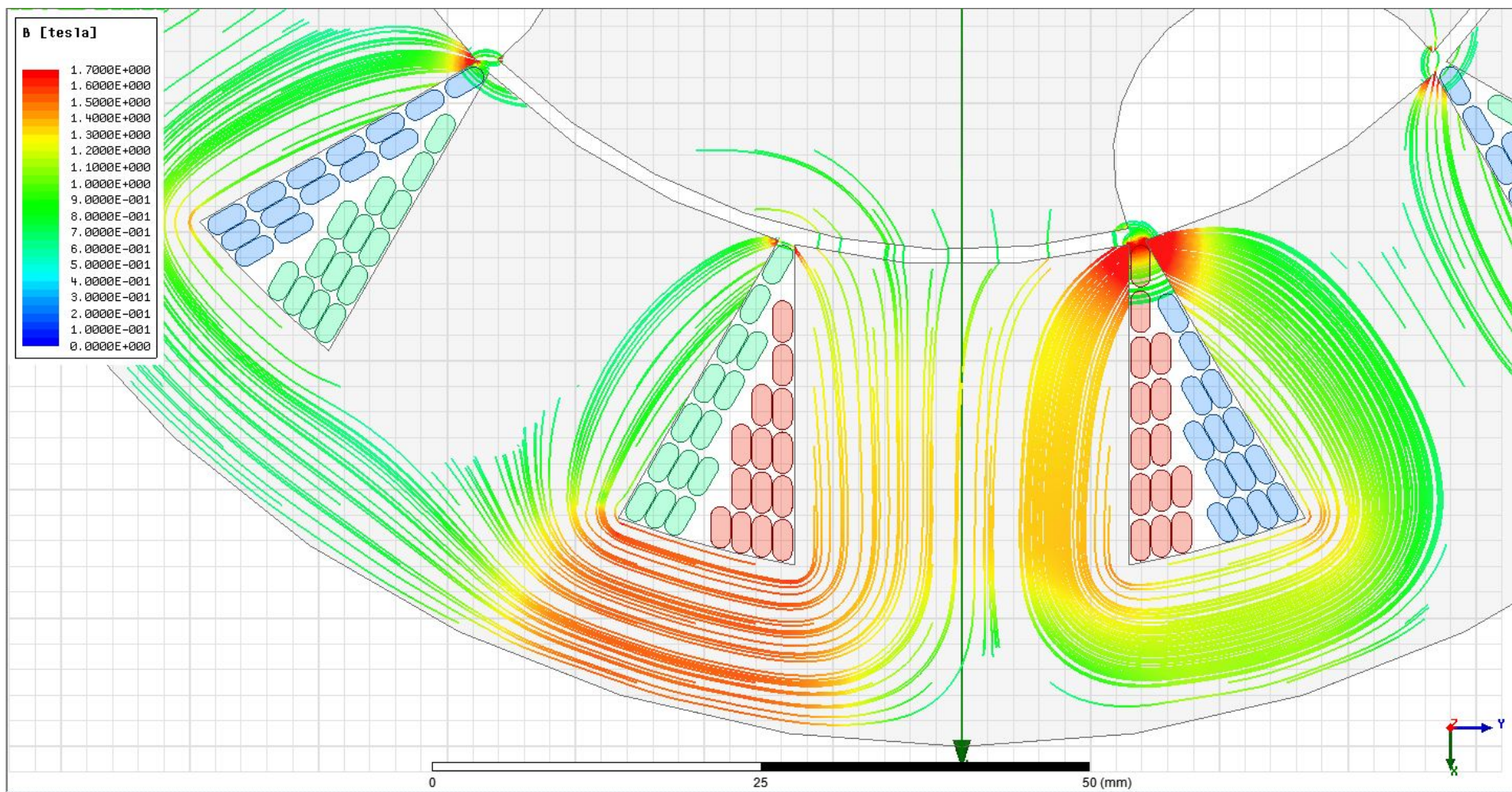


ILEAG e.V.
Institut für leichte elektrische Antriebe und Generatoren

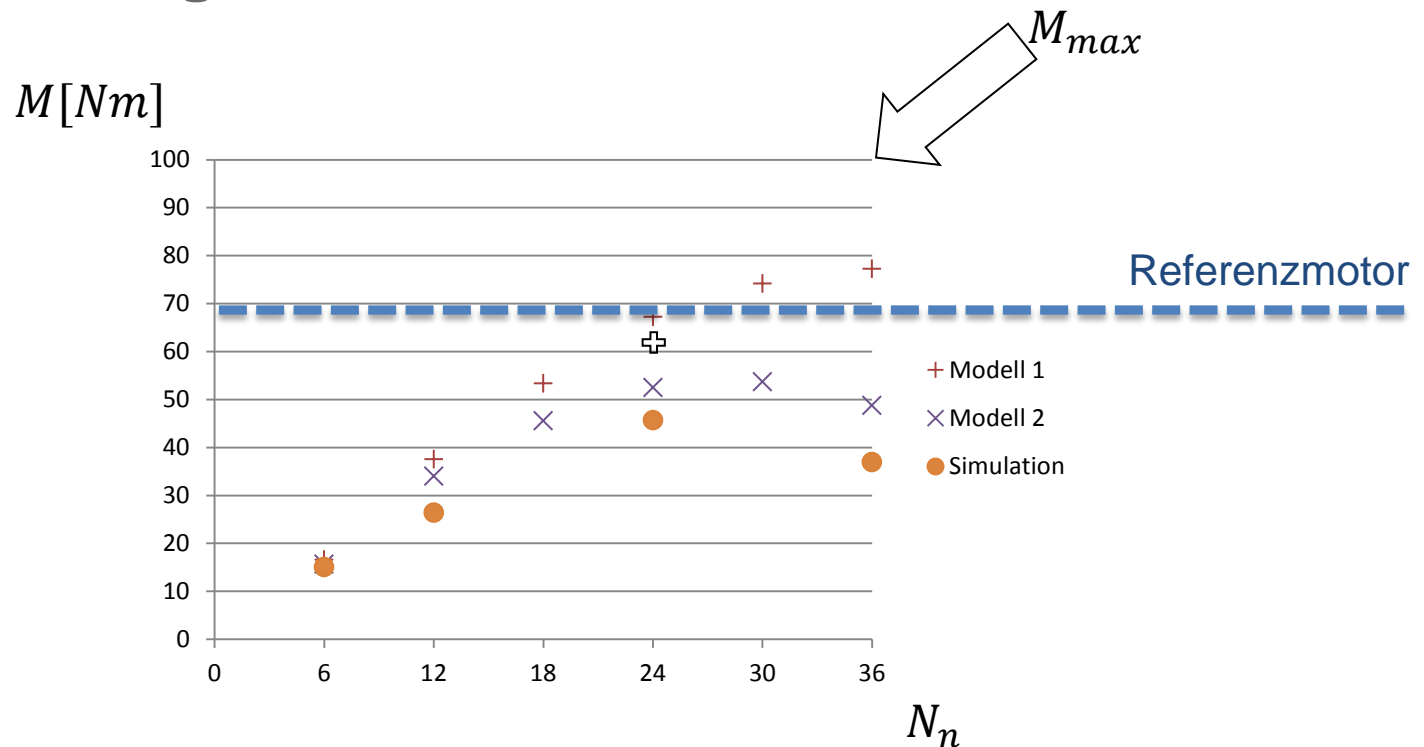


Simulationsergebnisse





Simulationsergebnisse



Erkenntnis: Drehmoment skaliert nur dann mit der Zahl der Pole, wenn Streufelder begrenzt sind → bei ASM, FSM und PMSM wird dies dadurch erreicht, dass im Rotor eine gegenläufige magnetische Spannung erzeugt wird



Gliederung

Anforderungen

Stand der Technik

Ansatz SRS

Simulationsergebnisse

Ausblick



Zusammenfassung Ausblick

- SRS Konzept:
 - Wirksamkeit durch Simulation bestätigt
 - Einfluss von Streuflüssen: unbefriedigende Ergebnisse bei hochpoligen Maschinen
 - Analytisches Modell überarbeitet und kalibriert → Erkenntnis: SRS erreicht bei 24.. 27 Nuten maximales Drehmoment
- Ausblick:
 - Weiterentwicklung SRS notwendig
 - Erste Simulationsergebnisse vielversprechend

